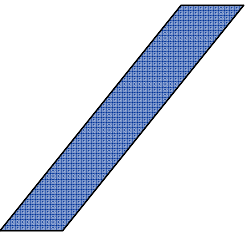


# IMU Sensor Kalman Filter

2024.04.17

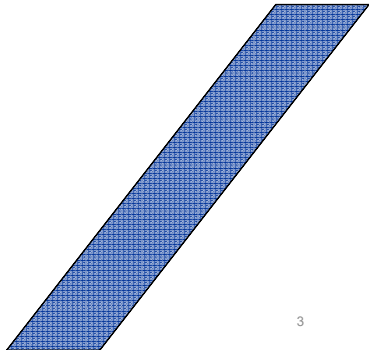
한국공학대학교 메카트로닉스공학과  
정 지 우

# CONTENTS



- 01 개요
- 02 실험 환경
- 03 센서 데이터 Pitch각
- 04 선형 칼만필터
- 05 선형 칼만필터 적용 결과

## 01 개요

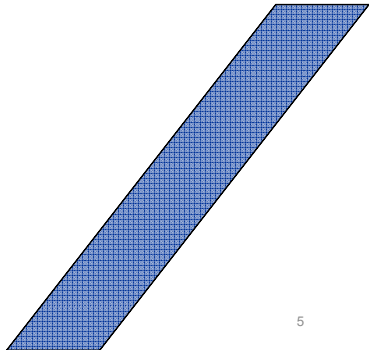




## 01 개요

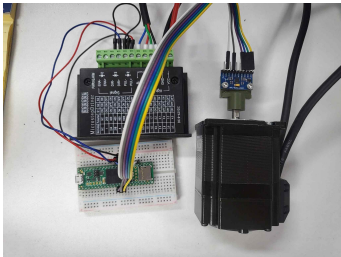
재진 장비의 실제 변위값을 모니터링하기 위한  
IMU센서를 활용한 오일러각 측정

## 02 실험환경



## 02 실험 환경

### 실험 구성



정지 상태와 0.0625Hz로  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 로 회전하는 경우 측정

센서의 y축 회전으로 실험 간소화

Motor	Motor Driver	Sensor	MCU
StepMotor 23H255- 052ED2500	MSD-224 32분주 0.5A	MPU9250	Teensy4.1

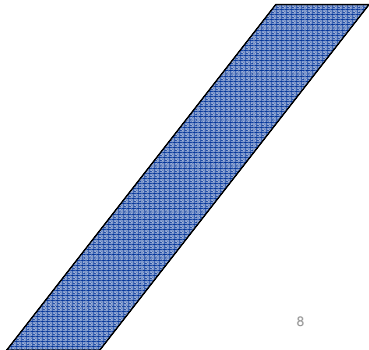
## 02 실험 환경

IMU Sensor		
MPU9250		
Accelerometer	Scale	$\pm 4G$
	Low pass filter	188Hz
	Output data rate	4000Hz
	Initial Tolerance	$\pm 3\%$
Gyroscope	Scale	500DPS
	Low pass filter	188Hz
	Output data rate	8000Hz
	Sensitivity scale factor tolerance	$\pm 3\%$

MCU	
Teensy4.1	
Framework	Arduino
Clock	600MHz
Communicate MPU9250	SPI(1M Hz), 4000Hz
Communicate PC	USB(250KHz), 4000Hz

PC	
Python 3.10.9	
FFT Min Frequency	1Hz
FFT Max Frequency	2000Hz

### 03 센서 데이터 Pitch각

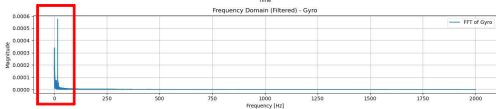
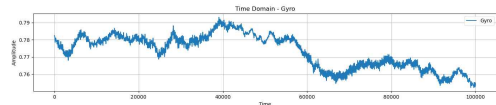
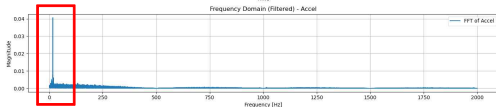
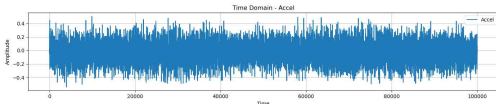




## 03 센서 데이터 분석

모터 정지 상태에서의 Gyro Pitch 각도

$$Roll_{Acc} = \arctan\left(\frac{Acc_x - offset_{Acc_x}}{\sqrt{(Acc_y - offset_{Acc_y})^2 + (Acc_z - offset_{Acc_z})^2}}\right)$$



$$Roll_{Gyro}^k = Roll_{Gyro}^{k-1} + (Gyro_x - offset_{Gyro_x}) dt$$

가속도 센서는 모든 주파수 대역에서 자이로 센서에 비해 노이즈가 큼

센서의 데이터가 평균 -0.035134로 0에 근접함

자이로 센서는 모든 주파수 대역에서 가속도 센서에 비해 노이즈가 작지만 특히 30Hz 이상 대역에서 거의 0에 수렴

offset이 지속적으로 바뀌는 경향이 보임

공통적으로 20Hz 부근의 노이즈가 큼  
실험 환경에 있는 컴퓨터에 의한 노이즈로 예상됨

## 03 센서 데이터 Pitch각

센서 정지 상태에서의 Pitch 각도



전체적으로 노이즈가 증가하였지만  
특히 230Hz 부분에서 노이즈가  
증가하였음  
스텝모터의 노이즈로 예상됨

가속도 센서는 자이로 센서에 비해  
노이즈가 매우 큼

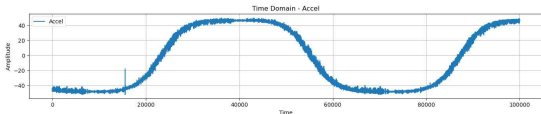
평균 -0.00265로 0에 가깝게 유지함

자이로 센서는 0에 가까운 주파수  
영역 이외에는 거의 0에 가까운 크  
기를 보이며 노이즈가 작음

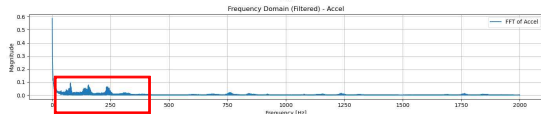
하지만 시간에 따라 위치가 지속적  
으로 바뀜

## 03 센서 데이터 Pitch각

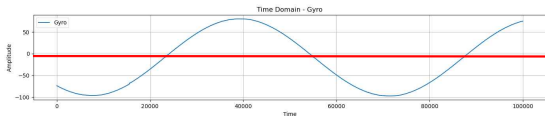
센서 회전 상태에서의 Accel Pitch 각도



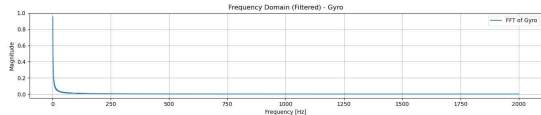
입력의 파형과 측정된 파형이 다른  
arctan연산에 의한 영향으로 예상됨



0.0625Hz의 sin파형 입력에 의해  
0 근처에서 크게 증가하며,  
250Hz 이하에서 노이즈가 많이 생김

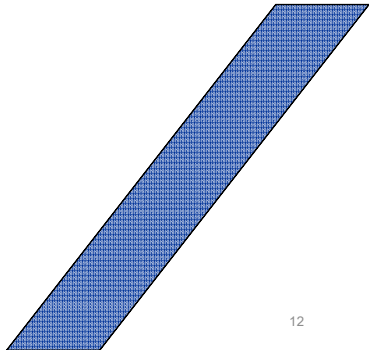


자이로 센서로 측정된 각도는  
-방향으로 offset이 있음이 확인됨



따라서 두 센서를 퓨전하여 노이즈와  
offset을 개선할 필요가 있음

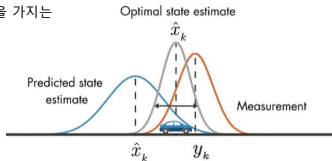
## 04 선형 칼만 필터



## 01 선형 칼만 필터

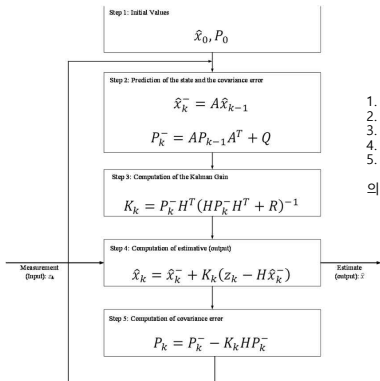
모델로부터 추측된 정보와 센서를 통해 측정된 정보를 통해 실제 정보를 추정

선형 칼만 필터에서는 추측된 정보, 측정된 정보가 각각의 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 가우시안 분포를 따름을 가정



1. 초기값 선정
2. 추정값과 오차 공분산 예측
3. 칼만 이득 계산
4. 추정값 계산
5. 오차 공분산 계산

의 과정을 통해 추정값의 정확도를 향상 시킴



목적	변수
외부 입력	$z_k$
최종 출력	$\hat{x}_k$
시스템 모델	$A, H, Q, R$
예측값 및 기타 파라미터	$\hat{x}_k^-, P_k^-, P_k, K_k$

## 04 선형 칼만 필터

센서데이터 적용

### 시스템 모델링

시스템  $A = 1$

시스템 잡음 공분산  $Q = (4 \cdot \Delta t)^2$

측정 잡음 공분산  $R = 9$

출력행렬  $H = 1$

이전 측정 결과 자이로 센서는 각도의  
변화를 빠르게 추적가능하지만  
오프셋이 계속 바뀜.

따라서 다음과 같이 선정

상태 추정 : 자이로 센서  
측정 : 가속도 센서

```
void MPU9250::kalman_1d(float KalmanState, float KalmanUncertainty,
    float KalmanInput, float KalmanMeasurement, float deltatime)
/*
    kalmanState : 이전 추정값
    KalmanUncertainty : 오차공분산
    kalmanInput : 시스템의 변화량
    kalmanMeasurement : 측정값
*/
{
    float A = 1*1; // 시스템 행렬
    float Q = pow(4*deltatime,2); // 시스템 잡음 공분산 (측정된 주기가 길어지면 오차가 증가)
    float H = 1*1; // 출력 행렬, 측정값과 상태변수의 관계
    float R = 3*3; // 측정 잡음 공분산

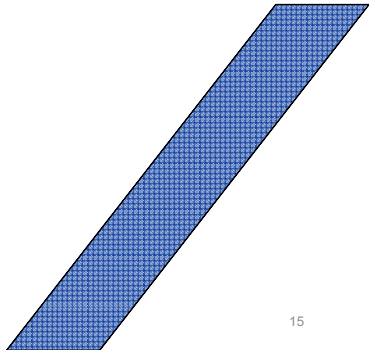
    KalmanState = KalmanState + deltatime * KalmanInput; // calculate gyro to predict angle
    KalmanUncertainty = (A * KalmanUncertainty * A) + Q;

    float KalmanGain = KalmanUncertainty * H / (H * KalmanUncertainty + R);

    KalmanState = KalmanState + KalmanGain * (KalmanMeasurement - H * KalmanState);
    KalmanUncertainty = (1 - KalmanGain) * KalmanUncertainty * H;

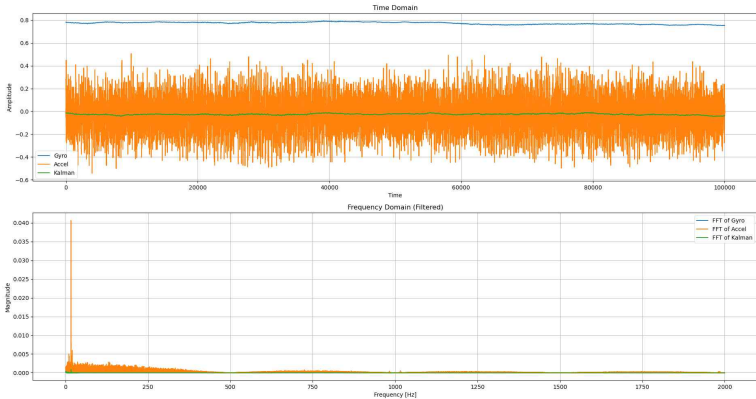
    Kalman1DOutput[0] = KalmanState;
    Kalman1DOutput[1] = KalmanUncertainty;
}
```

## 05 선형 칼만필터 적용 결과



## 05 선형 칼만 필터 적용 결과

모터 정지 상태에서의 Pitch각도



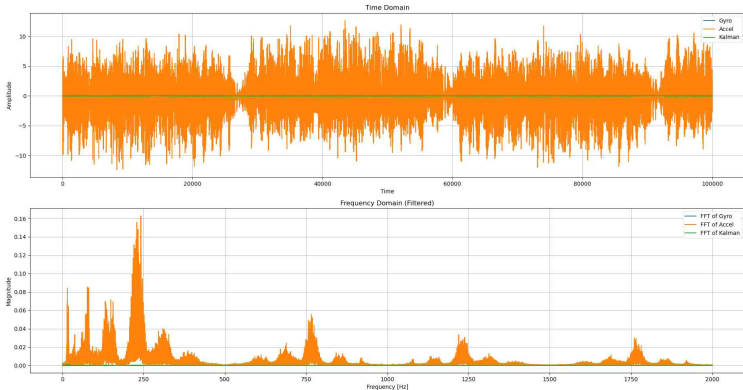
kalman filter를 적용하지 않았을 경우에 비해 실제 상태에 근접하게 접근함

주파수 영역에서 크기가 줄어들었으며, 0Hz 근처에서도 0의 근접한 결과를 보이며 성능이 향상되었음을 확인



## 05 선형 칼만 필터 적용 결과

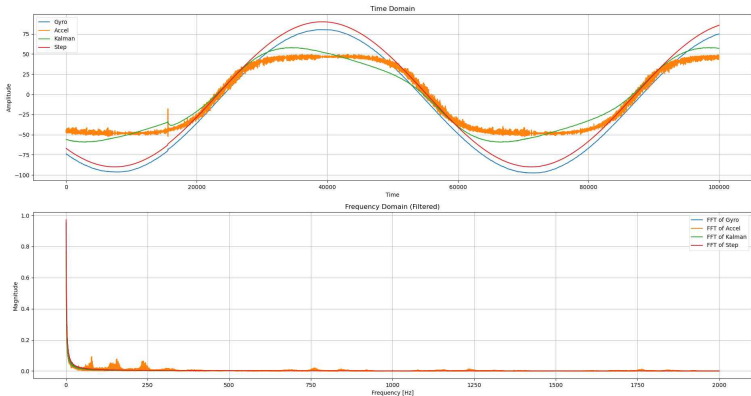
센서 정지 상태에서의 Pitch 각도



모터의 노이가 있는 상태에서도 0도를 거의 유지함

## 05 선형 칼만 필터 적용 결과

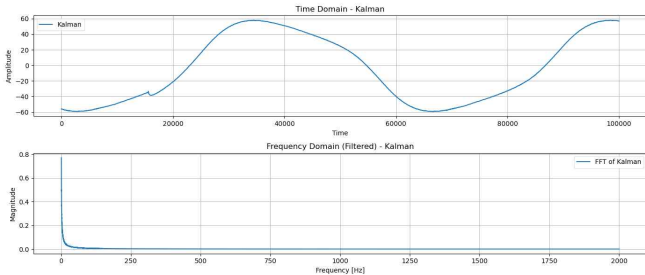
모터 동작 상태에서의 Pitch각도



-25도 ~ 25도 영역에서는 입력과 매우 유사한 측정 결과를 보이며 노이즈와 offset error가 개선됨

## 05 선형 칼만 필터 적용 결과

개선해야 하는 사항



- 실제 입력 Sin파형과 다른 형상

arctan의 영향으로 예상되며 가속도 센서에서 Pitch각을 선형적으로 구하기 위한 알고리즘의 개선이 필요

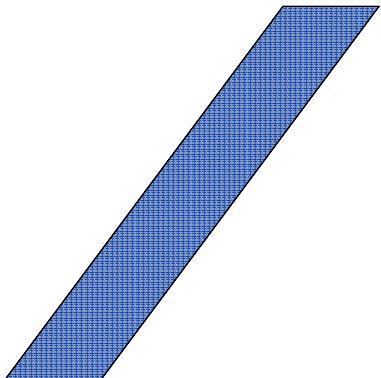
- 오버슛과 언더슛

시스템 변수와 노이즈 분산을 튜닝

감사합니다

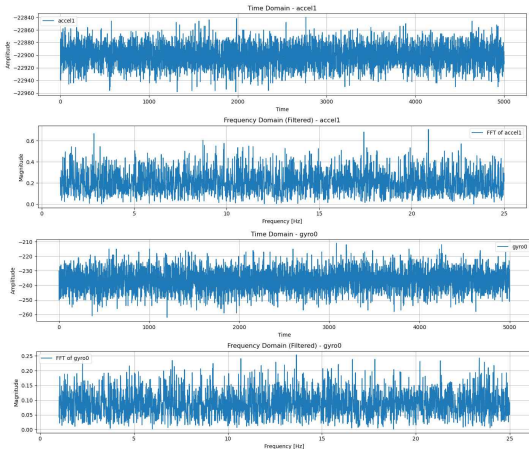


한국공학대학교



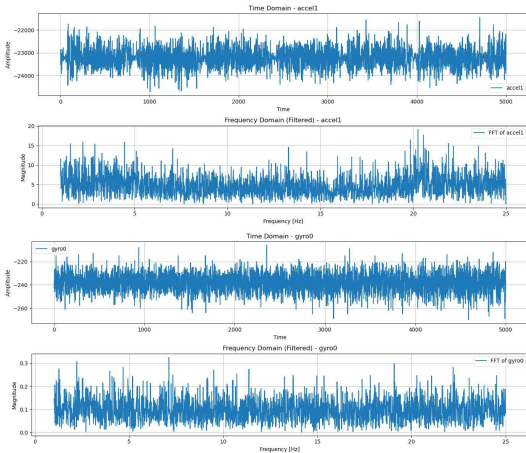
## 03 센서 데이터 분석

y축 accel, x축 gyro Raw data



## 03 센서 데이터 분석

y축 accel, x축 gyro Raw data



## 03 센서 데이터 분석

y축 accel, x축 gyro Raw data

